doi:10.13866/j.azr.2019.04.19

基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征①

吴英杰，李　玮，王文君，全　强，陈晓俊，
尹　航，周泉成，徐凯然
（中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特　010020）

摘　要： 利用1971—2015年内蒙古地区52个气象站逐月降水量观测数据，采用降水量距平百分率（P_a），从干旱频率和干旱变化趋势率分析了研究区近45 a来干旱时空分布特征。结果表明：从时间变化来看，年降水量呈微弱的下降趋势，并于1998年和2012年发生突变；春季、秋季和冬季降水量变化呈上升趋势，夏季降水量变化呈下降趋势；年尺度干旱主要发生在1999—2011年；季节尺度干旱发生频率为冬旱 > 春旱 > 秋旱 > 夏旱。从空间变化来看，多年平均降水量由东向西呈逐级递减趋势，降水分布地域特征明显，大兴安岭以东地区和巴彦淖尔市西部地区降水变化趋势率较高，呼伦贝尔市西北部、通辽市中南部、赤峰市中部、阿拉善盟西部地区降水变化趋势率较低；发生不同等级干旱的几率为轻旱 > 特旱 > 中旱 > 重旱，各级干旱易发生地区集中在呼伦贝尔市西部、赤峰市中北部、通辽市北部、锡林郭勒盟中西部以及阿拉善盟西部地区。P_a 变化趋势率表现为，呼伦贝尔市中东部、巴彦淖尔市西部和阿拉善盟东部呈上升趋势，即干旱程度减轻；兴安盟南部至鄂尔多斯市、阿拉善盟中西部呈下降趋势，即干旱程度加重。

关键词： 干旱等级；降水量距平百分率（P_a）；内蒙古

气象干旱是指在一定区域的较短时期内，因降水明显少于正常状态而导致水资源减少、影响植物正常生长的一种自然现象[1]。地处内陆的内蒙古地区，大气中的水汽主要来自太平洋和印度洋上的水汽输送，少部分来自大西洋和北冰洋上的水汽输送，这些水汽经过数千米的长途跋涉，辗转消耗，到达内蒙古上空已所剩无几[2]，所以，干旱少雨是内蒙古气候的主要特点。探索降水这一关键要素在时间序列中蕴含的特征，进而反映其发展趋势有助于科学地进行抗旱减灾对策的研究[3]。近年来，众多学者从不同角度对内蒙古高原气象干旱特征进行了分析，其中涉及到不同下垫面条件[4-5]、不同干旱指数[6-7]、不同时间跨度及尺度[8-9]，研究结果表明内蒙古典型草原区年度与季节的干旱均较为频繁且持续时间较长[7]，新世纪初干旱程度有所加剧[4]，而内蒙古中东部区域性春季重旱于1980年之后略有缓解，局部重旱则有所加剧[5]。由于相关研究采用的时间序列较短，且气象站点涵盖范围较小，因此，本文利用内蒙古地区52个气象站点的实测资料，在仅考虑降水这一关键因素的前提下，通过降水距平百分率直观反映出的降水异常[10]，从时间尺度和空间尺度上对内蒙古地区降水和干旱变化进行研究，以揭示该区域干旱的时空结构及其变化特征，为内蒙古的生态环境保护、农牧业生产和社会发展等提供科学依据。

1　研究方法与数据来源

1.1　研究方法

1.1.1　降水量距平百分率　降水量距平百分率是表征某时段降水量较常年值偏多或偏少的指标之一，能直观反映降水异常引起的干旱，计算公式如下：

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \qquad (1)$$

式中：P_a 为降水量距平百分率（%）；P 为某时段降水量（mm）；$\bar{P}$ 为计算时段同期气候平均降水量（mm）。

① 收稿日期：2018-10-11；　修订日期：2019-01-22
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金项目（2015MS0387，2017BS0512）；中国水利水电科学研究院科研专项项目（MK2016J08，MK2016J02）；国家自然科学基金项目（51579157，51779156）
作者简介：吴英杰（1982－），男，博士，主要从事牧区干旱与减灾、生态水文学等方面研究. E-mail：wuyingjie1230@163.com
通讯作者：王文君. E-mail：30179903@qq.com

$$\bar{P}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_i \tag{2}$$

式中:P_i 为某时段降水量(mm);n 为年数,$i=1,2,3,\cdots,n$。

1.1.2 降水量距平百分率气象干旱等级标准 国家气象干旱等级标准[11]根据降水量距平百分率,将干旱等级划分为5级(表1)。

表1 降水量距平百分率干旱等级

Tab.1 Drought level classification based on the percentage of precipitation anomaly

等级	类型	降水量距平百分率/%		
		月尺度	季尺度	年尺度
1	无旱	$P_a>-40$	$P_a>-25$	$P_a>-15$
2	轻旱	$-60<P_a\leqslant-40$	$-50<P_a\leqslant-25$	$-30<P_a\leqslant-15$
3	中旱	$-80<P_a\leqslant-60$	$-70<P_a\leqslant-50$	$-40<P_a\leqslant-30$
4	重旱	$-95<P_a\leqslant-80$	$-80<P_a\leqslant-70$	$-45<P_a\leqslant-40$
5	特旱	$P_a\leqslant-95$	$P_a\leqslant-80$	$P_a\leqslant-45$

1.1.3 干旱频率 评价某站点有资料年份内发生不同等级干旱频率的程度,计算公式如下:

$$P_i=\frac{n}{N}\times100\% \tag{3}$$

式中:P_i 为干旱频率;N 为某气象站点有气象资料的年数;n 为该站发生不同等级干旱的总年数,按照 P_a 不同程度的干旱发生年数计算不同程度的干旱频率。

1.1.4 干旱站次比 为某一区域内发生干旱站点数占全部站点数的比例,用来评价干旱影响范围的大小,计算公式如下:

$$P_j=\frac{m}{M}\times100\% \tag{4}$$

式中:P_j 为干旱站次比;M 为气象站点总数;m 为发生干旱的站点数。干旱的影响范围定义:当 $P_j\geqslant50\%$ 时,为全域性干旱;当 $35\%\leqslant P_j<50\%$ 时,为区域性干旱;当 $25\%\leqslant P_j<35\%$ 时,为部分区域性干旱;当 $10\%\leqslant P_j<25\%$ 时,为局域性干旱;当 $P_j<10\%$ 时,为无明显干旱。

1.1.5 干旱强度 评价干旱严重程度,计算公式如下:

$$S_{ij}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}|P_{ai}| \tag{5}$$

式中:S_{ij}为干旱强度;P_{ai}为发生干旱的 i 站点的 P_a 值;m 为发生干旱的站点数。当 $0.5\leqslant S_{ij}<1.0$ 时,干旱强度为轻度干旱;当 $1.0\leqslant S_{ij}<1.5$ 时,干旱强度为中度干旱,当 $S_{ij}\geqslant1.5$ 时,干旱强度为重度干旱。

1.1.6 气候变化趋势率 用 X 表示样本大小为 n 的气候要素;t 表示相对应的时间,建立 X 与 t 之间一元线性回归方程,即:

$$X=at+b,(t=1,2,3,\cdots,n) \tag{6}$$

式中:a 为回归系数;b 为截距,a 和 b 用最小二乘法进行估计。将 a 的10倍作为气候要素的变化趋势率。

1.1.7 降水突变 应用M-K法分析研究区多年降水的突变特征,该法是一种非参数统计检验方法,变量可以不具有正态分布特征,也不受少数异常值的干扰,适用于气候、水文变量的趋势性检验[12-13]。其趋势检验原理如下:

$$S=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{j=k+1}^{N}\text{sign}(x_j-x_k) \tag{7}$$

$$\text{sign}(x_j-x_k)=\begin{cases}1 & \text{if} \quad x_j>x_k\\ 0 & \text{if} \quad x_j=x_k\\ -1 & \text{if} \quad x_j<x_k\end{cases}$$

$$(k=1,2,\cdots,N-1;\ j=k+1,k+2,\cdots,N) \tag{8}$$

$$Z^*=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\text{var}^*(S)}} & \text{if} \quad S>0\\ 0 & \text{if} \quad S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\text{var}^*(S)}} & \text{if} \quad S<0\end{cases} \tag{9}$$

$$\text{var}^*(S)=\frac{N(N-1)(2N+5)-\sum_{p=1}^{N_p}[m_p(m_p-1)(2m_p+5)]}{18} \tag{10}$$

式中:N_p 为序列中结(重复出现的数据组)的个数;m_p 为结的宽度(第 p 组重复数据组中的重复数据个数)。

当 $N\geqslant10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,将 S 标准化得到 Z^*。若 $Z^*>0$,趋势增加,$Z^*<0$,趋势减小。在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,当 $|Z^*|>1.96$ 时,则趋势显著。

采用 M-K 方法检验序列突变时,同一组数据要计算 2 次,即把一组数据按顺和逆时间次序分别计算统计变量 UF_k 和 UB_k,把计算出的两组结果绘成曲线,当两条曲线相交于某一点时,则认为该点为突变点。

$$UF_k = \frac{pt_k - E(pt_k)}{\sqrt{\mathrm{var}(pt_k)}} \tag{11}$$

$$pt_k = \sum_{1}^{k} n_k \tag{12}$$

式中:n_k 是序列中满足 $x_j > x_k$ 的个数($j = k+1, k+2, \cdots, N$; $k = 1, 2, \cdots, N-1$);$E(pt_k)$ 是 pt_k 的均值,$\mathrm{var}(pt_k)$ 是 pt_k 的方差。

$$E(pt_k) = \frac{k(k-1)}{4} \tag{13}$$

$$\mathrm{var}(pt_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \tag{14}$$

$$UB_k = -UF_k,\ (k = n, n-1, \cdots, 1) \tag{15}$$

1.2 数据来源

选取内蒙古境内 52 个气象观测站(图 1)实测降水数据进行分析,该套数据集来源于中国气象数据网。在数据使用前,要对该数据集进行"三性审查",对站点中缺测的数据通过回归分析进行插补,最终形成 1971—2015 年的逐月降水资料。

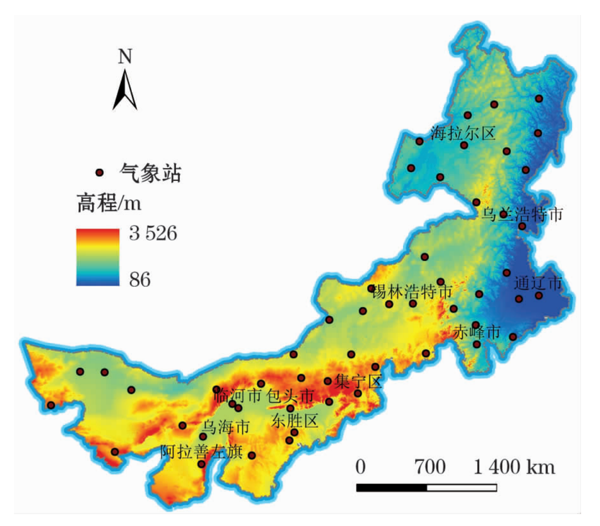


图 1 研究区 DEM 及气象数据监测站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of elevation and meteorological stations in Inner Mongolia

2 结果与分析

2.1 降水特征分析

2.1.1 降水年际变化特征 研究区 1971—2015 年降水量变化情况如图 2 所示,可以看出,研究区年降水量变化总体呈微弱的下降趋势,为 −0.098 mm·(10a)$^{-1}$,其中,2001 年降水量最小(219.6 mm),1998 年最大(444.0 mm)。此外,1972、1980、1982、2001 年和 2007 年为降水量极低年;1990、1998 年和 2012 年为降水量极高年。

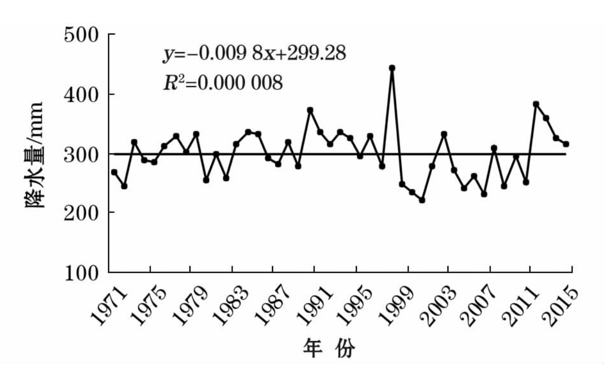


图 2 1971—2015 年研究区年降水量变化

Fig. 2 Variation of annual precipitation in Inner Mongolia during the period of 1971 − 2015

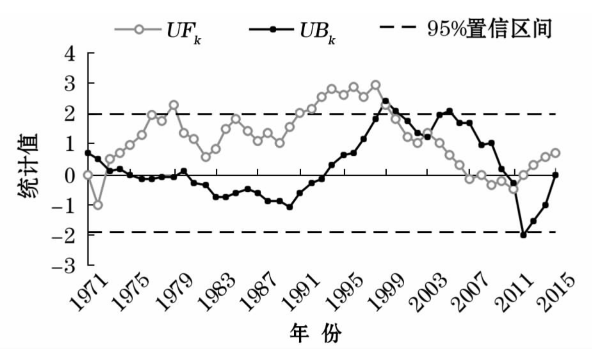


图 3 1971—2015 年研究区年降水量 M-K 检验曲线

Fig. 3 M-K test of annual precipitation in Inner Mongolia during the period of 1971 − 2015

由图 3 可知,研究区年降水量在 20 世纪 70 年代和 80 年代处于波动期,之后呈上升趋势,从 1991 年左右降水量呈显著的上升趋势,到 90 年代末,降水量呈稳定的下降趋势。其中,在 1997—1999、2010—2012 年期间发生过降水突变。进一步结合图 2 分析结果,可以判定年降水量在 1998 年和 2012 年发生突变。

2.1.2 降水季节变化特征 根据气象学季节划分,研究区 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。由图 4 可知,研究区降水主要集中在夏、秋两季,其中夏季降水量下降速率为 4.64 mm·(10a)$^{-1}$,其余春、秋、冬季的降水量均呈上升趋势,变化率分别为 3.37 mm·(10a)$^{-1}$,0.70 mm·(10a)$^{-1}$和 0.63 mm·(10a)$^{-1}$。

图 5a 表明,研究区春季降水波动较大,从 20 世

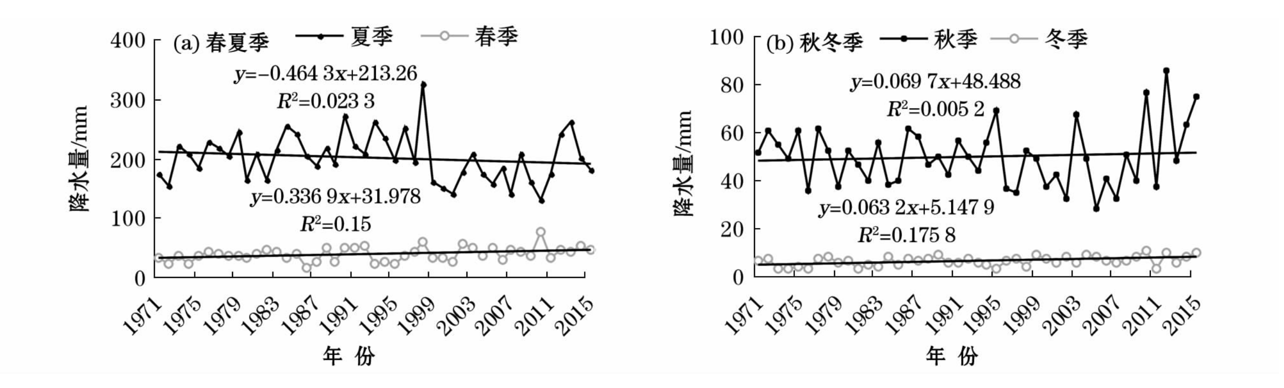


图 4 1971—2015 年研究区季节降水量变化

Fig. 4 Seasonal variation of precipitation in Inner Mongolia during the period of 1971 – 2015

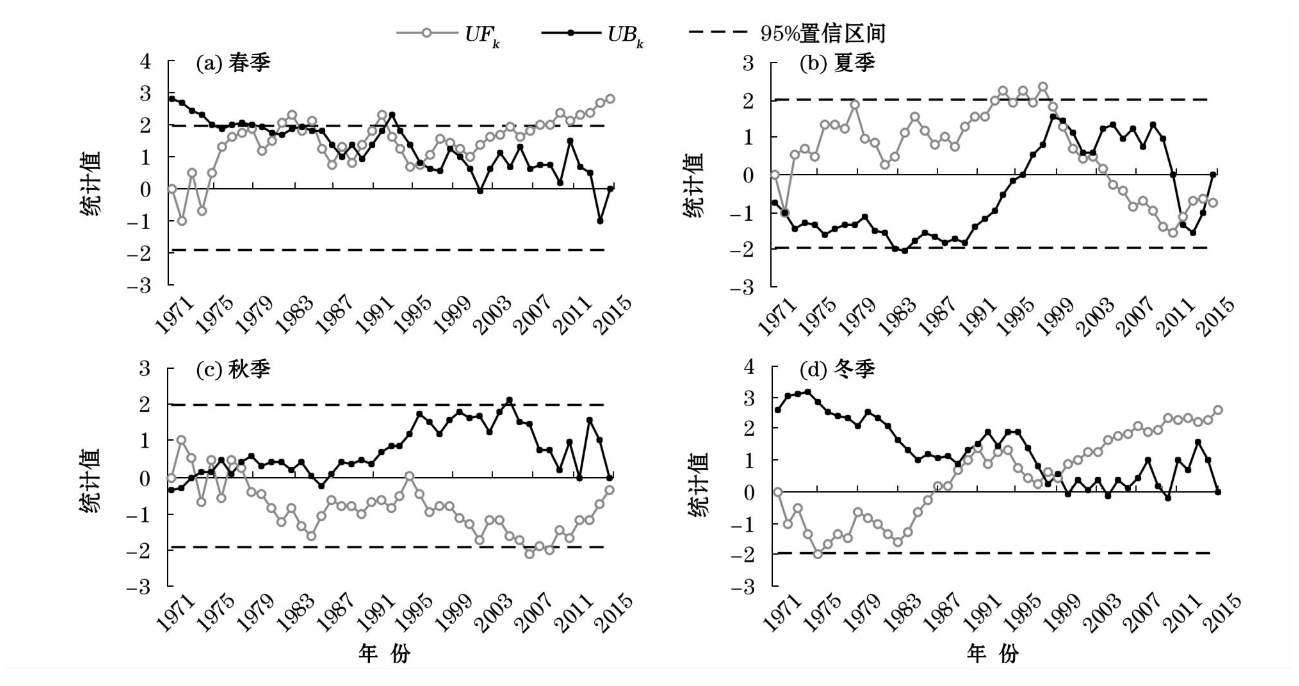


图 5 1971—2015 年研究区季节降水量 M-K 检验曲线

Fig. 5 M-K test of seasonal precipitation in Inner Mongolia during the period of 1971 – 2015

纪 90 年代末期开始，降水量呈上升趋势，到了 2007 年左右，降水上升趋势变得显著。春季降水分别在 1982 年、1988 年和 1996 年发生 3 次突变。夏季降水波动趋势和年降水波动趋势基本一致，同样于 1998 年和 2012 年发生突变（图 5b）。研究区秋季降水只在 1976 年发生突变，并且从 70 年代初期到 80 年代中期处于下降阶段，之后经历了一段时间的稳定波动期，从 90 年代中期开始呈下降趋势，其中在 2007 年下降趋势显著，在此之后，降水量呈上升趋势（图 5c）。由图 5d 可以看出，研究区冬季降水量在 2000 年发生过一次突变，于 80 年代初期到 90 年代初期呈上升趋势，之后几年有小幅度的下降，但从 1997 年开始又出现上升的趋势，并于 2007 年开始，降水量的上升趋势显著。

2.1.3 降水空间分布特征 从图 6a 可以看出，研究区降水分布地域特征明显，降水量最多的地区位于大兴安岭以东的东北部地区，即呼伦贝尔市东北部，年降水量接近 500 mm；其次是呼伦贝尔市中部、兴安盟、锡林郭勒盟东南部、呼和浩特市、乌兰察布市最南部、鄂尔多斯市东部，以及赤峰市南部和通辽市的最南部，年降水量可达 350 ~ 450 mm；鄂尔多斯市中部、巴彦淖尔市东南部、乌兰察布市中部、锡林郭勒盟东部、呼伦贝尔市西部年降水量为 250 ~ 350 mm；阿拉善盟东部、巴彦淖尔市大部、鄂尔多斯市西部、乌兰察布市北部、锡林郭勒盟西部等地一般在 100 ~ 250 mm；阿拉善盟大部年降水量不足 100 mm，降水量最少的阿拉善盟西北部，多年平均降水量仅 37 mm。研究区多年平均降水量按盟市由高到

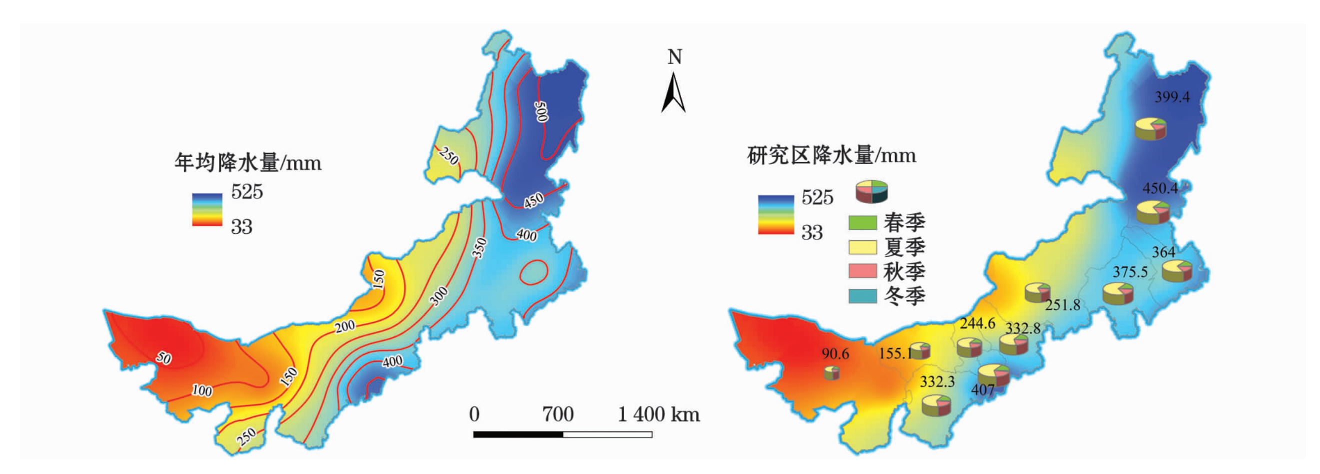


图 6　研究区多年平均降水量分布

Fig. 6　Distribution of average precipitation in Inner Mongolia

低排列为:兴安盟 > 呼和浩特市 > 呼伦贝尔市 > 赤峰市 > 通辽市 > 乌兰察布市 > 鄂尔多斯市 > 锡林郭勒盟 > 包头市 > 巴彦淖尔市 > 阿拉善盟(图 7 和图 6b);按区域由高到低排列为:东部区 > 中部区 > 西部区(图 8)。

从年降水量变化趋势率(图 9a)可以看出,呼伦

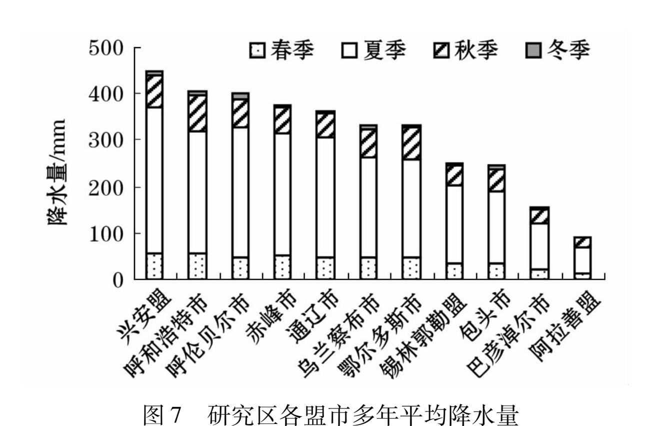


图 7　研究区各盟市多年平均降水量

Fig. 7　Multi-year average annual precipitation in Inner Mongolia

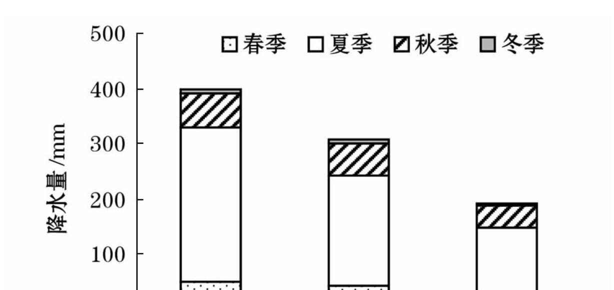


图 8　研究区东中西部多年平均降水量

Fig. 8　Multi-year average annual precipitation in the eastern, central and western parts of Inner Mongolia

贝尔市中东部、兴安盟北部、巴彦淖尔市大部以及阿拉善盟东部呈上升趋势,其中大兴安岭以东地区最高为 18.50 mm·(10a)$^{-1}$,其次为巴彦淖尔市海力素地区,为 11.37 mm·(10a)$^{-1}$。其余地区年降水量变化趋势率均呈下降态势,其中阿拉善盟西部梧桐沟地区年降水量下降趋势率最大,为 -16.62 mm·(10a)$^{-1}$。

2.2　干旱特征分析

2.2.1　干旱年际变化特征　内蒙古地区年际降水量变幅较大,且分布不均匀,使得该地区多次发生不同程度的干旱,其中大部分集中在 1999—2011 年。由图 10a 可以看出,1972、1980 年和 1982 年发生了一定程度的旱情;1999—2001 年发生了连续性大旱,特别是 2001 年,P_a 值达 -26.56,为历年最低;2005—2007、2009 年和 2011 年又发生了比较严重的连续性干旱(表 2)。按照 P_a 年尺度干旱等级划分标准,45 a 中,有 9 a 发生了干旱,频率为 20%,其中 P_a 值在 -15 ~ -20 之间的有 6 a(1972、1980、1999、2005、2009 年和 2011 年),在 -20 以下的有 3 a(2000、2001 年和 2007 年)。所以,发生频率高、连续性强是该地区干旱年际变化的主要特征。

2.2.2　干旱季节变化特征　春季 P_a 序列(图 10b)表明,在 45 a 间,发生春旱年份有 10 a,分别是 1972、1974、1986、1987、1989、1993—1995、2001 年和 2006 年,发生频率为 22.22%。P_a 值在 -25 ~ -40 之间的有 7 a(1972、1974、1987、1989、1994、2001 年和 2006 年);P_a 值在 -40 以下的有 3 a(1986、1993 年和 1995 年)。由此可知,春旱集中发生在 1986—1995 年,其中 1986 年为极旱年。

夏季 P_a 序列(图 10c)表明,在45 a间,发生夏

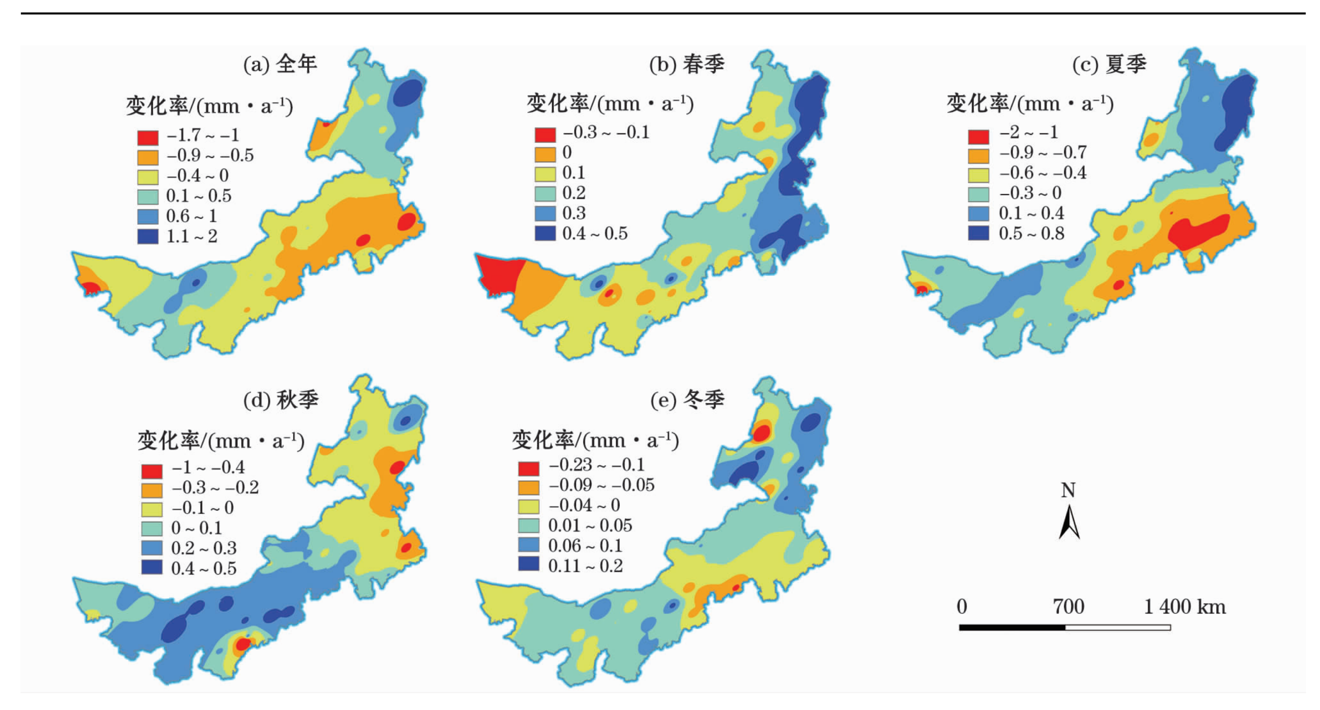


图 9 研究区多年平均降水量变化趋势率分布

Fig. 9 Change trend of multi-year average annual precipitation in Inner Mongolia

图 10 1971—2015 年研究区降水量距平百分率变化

Fig. 10 Variation of precipitation anomaly percentage in Inner Mongolia during the period of 1971 – 2015

表 2　研究区干旱年份降水量距平百分率

Tab. 2　Percentages of precipitation anomaly in Inner Mongolia in drought years

年份	降水量距平百分率/%					干旱等级				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季	全年	春季	夏季	秋季	冬季
1972	-17.88	-38.61	-24.16	22.25	14.52	轻旱	轻旱	无旱	无旱	无旱
1973	6.89	-11.00	9.94	9.85	-50.90	无旱	无旱	无旱	无旱	中旱
1974	-4.06	-37.38	3.18	-1.55	-45.94	无旱	轻旱	无旱	无旱	轻旱
1975	-5.25	-10.53	-8.97	21.32	-30.76	无旱	无旱	无旱	无旱	轻旱
1976	4.78	10.22	12.49	-28.16	-44.71	无旱	无旱	无旱	轻旱	轻旱
1980	-15.07	-19.32	-19.05	4.68	-1.73	轻旱	无旱	无旱	无旱	无旱
1981	0.05	-1.07	2.81	-7.62	-53.14	无旱	无旱	无旱	无旱	中旱
1983	5.47	6.32	5.40	11.06	-32.15	无旱	无旱	无旱	无旱	轻旱
1985	10.59	5.65	19.04	-20.54	-27.45	无旱	无旱	无旱	无旱	轻旱
1986	-3.04	-54.05	0.55	22.92	18.91	无旱	中旱	无旱	无旱	无旱
1987	-5.90	-31.01	-6.85	16.41	-4.19	无旱	轻旱	无旱	无旱	无旱
1989	-7.19	-32.32	-5.29	0.15	37.18	无旱	轻旱	无旱	无旱	无旱
1993	12.57	-41.50	28.97	-12.29	-9.37	无旱	轻旱	无旱	无旱	无旱
1994	8.21	-31.36	15.57	11.17	-27.80	无旱	轻旱	无旱	无旱	轻旱
1995	-1.54	-40.71	-2.21	38.63	-44.58	无旱	轻旱	无旱	无旱	轻旱
1996	9.95	-8.69	24.15	-27.22	2.25	无旱	无旱	无旱	轻旱	无旱
1997	-6.99	8.45	-3.77	-30.91	13.07	无旱	无旱	无旱	轻旱	无旱
1998	48.46	48.99	60.25	4.16	-37.17	无旱	无旱	无旱	无旱	轻旱
1999	-16.57	-11.35	-20.89	-2.54	38.32	轻旱	无旱	无旱	无旱	无旱
2000	-21.86	-14.02	-24.70	-24.70	13.64	轻旱	无旱	无旱	无旱	无旱
2001	-26.56	-29.79	-29.62	-14.96	-7.09	轻旱	轻旱	轻旱	无旱	无旱
2002	-7.13	46.23	-11.40	-35.12	26.61	无旱	无旱	无旱	轻旱	无旱
2005	-19.24	25.83	-22.60	-43.97	28.35	轻旱	无旱	无旱	轻旱	无旱
2006	-13.01	-27.90	-9.49	-18.04	2.34	无旱	轻旱	无旱	无旱	无旱
2007	-23.15	16.96	-29.78	-34.29	-10.98	轻旱	无旱	轻旱	轻旱	无旱
2009	-17.85	-3.42	-20.65	-20.45	31.31	轻旱	无旱	无旱	无旱	无旱
2010	-1.54	93.91	-36.09	52.80	68.27	无旱	无旱	轻旱	无旱	无旱
2011	-16.09	-16.28	-14.28	-24.89	-51.24	轻旱	无旱	无旱	无旱	中旱

旱年份有 3 a,分别是 2001、2007 年和 2010 年,其频率为 6.67%。1999—2011 年夏季降水量较同期偏低,P_a 基本为负值。总体来看,夏旱发生频率较低,且干旱等级较低。

秋季 P_a 序列(图 10d)表明,在 45 a 间,发生秋旱年份有 6 a,分别是 1976、1996、1997、2002、2005 年和 2007 年,频率为 13.33%。秋旱发生年份较为分散,其中 2005 年为极旱年,P_a 为 -43.97。

冬季 P_a 序列(图 10e)表明,在 45 a 间,发生冬旱年份有 11 a,分别是 1973—1976、1981、1983、1985、1994、1995、1998 年和 2011 年,其为 24.44%。P_a 值在 -25 ~ -40 之间的有 5 a (1975 年、1983 年、1985 年、1994 年、1998 年);P_a 值在 -40 以下的有 6 a (1973、1974、1976、1981、1995 年和 2011 年)。冬旱旱情普遍较重,且多发生在 2000 年以前,于 1973—1985 年间较为集中。

总体上,研究区冬旱发生频率最高,夏旱发生率最低。其中,1973—1974 年和 1985—1986 年为冬春连旱;1976 年为秋冬连旱;2001 年为春夏连旱;2007 年为夏秋连旱。

2.2.3　干旱空间分布特征　由图 11a 可以看出,呼伦贝尔市中东部、兴安盟北部地区、锡林郭勒盟南部以及乌兰察布市东南部地区发生旱灾概率较小。而呼伦贝尔市西南部、赤峰市大部、通辽市北部、锡林郭勒盟中西部、巴彦淖尔市东部以及阿拉善盟西南部较易发生轻旱(图 11b)。此外,呼伦贝尔市西北部、兴安盟东部、锡林郭勒盟西部、巴彦淖尔市西部和阿拉善盟西北部容易受到中旱影响(图 11c)。研究区重旱发生频率最高地区集中在呼伦贝尔市西部、通辽市北部、阿拉善盟东西部。其中,阿拉善盟吉兰泰地区重旱发生频率最高,达到 11.48% (图 11d)。就特旱而言,研究区特旱多集中在阿拉善盟

额济纳旗一带，3 个气象站拐子湖、额济纳旗和吉诃德特旱发生频率位列前 3，分别为 21.43%，19.64% 和 17.86%。

总体上看，研究区发生轻旱和特旱几率较高，中旱次之，重旱最低。各级干旱易发地区集中在呼伦贝尔市西部、赤峰市中北部、通辽市北部、锡林郭勒盟中西部以及阿拉善盟西部地区，这和研究区内降水空间分布规律一致，即多年平均降水量偏低地区比较容易发生气象干旱。

从 P_a 变化趋势率来看，呼伦贝尔市中东部、巴彦淖尔市西部和阿拉善盟东部呈上升趋势，即干旱程度有所降低，而由兴安盟南部向西至包头市和鄂尔多斯市、阿拉善盟中西部的干旱程度有所升高（图 12a）。春季 P_a 变化趋势率升高区域主要在兴

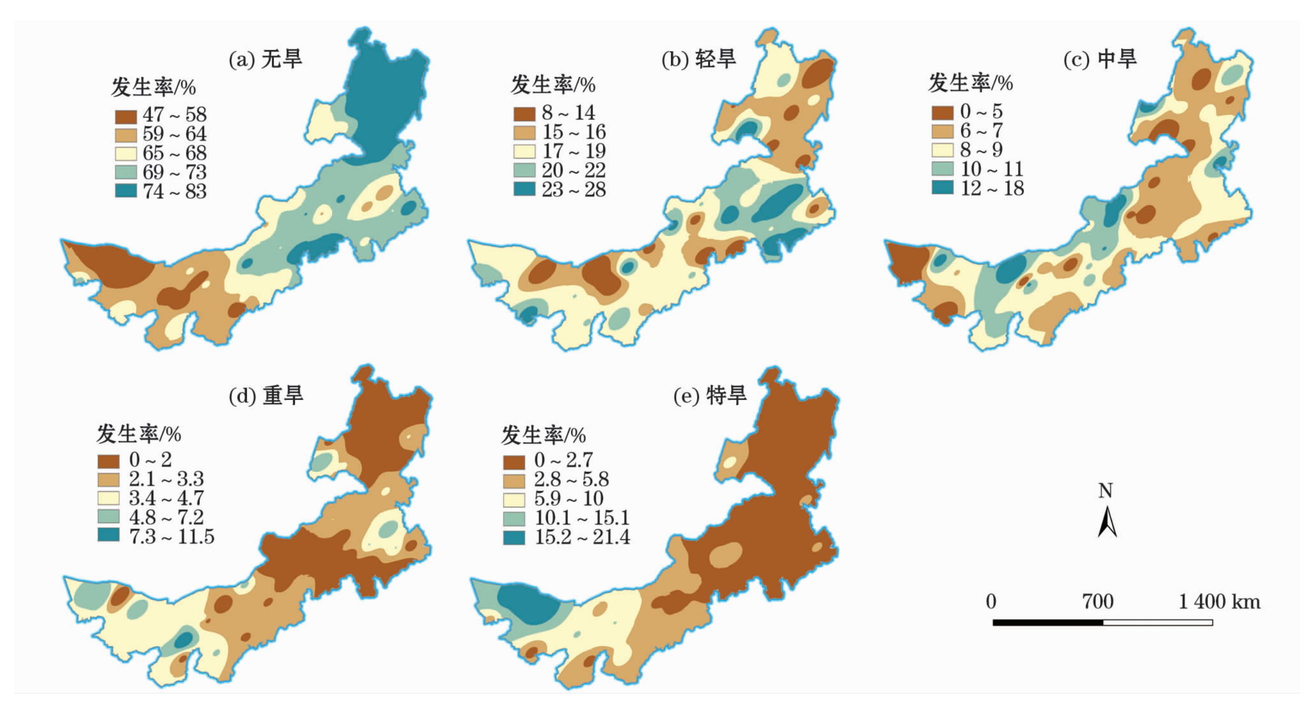


图 11 研究区不同等级干旱频率分布

Fig. 11 Distribution of drought frequency at different levels in Inner Mongolia

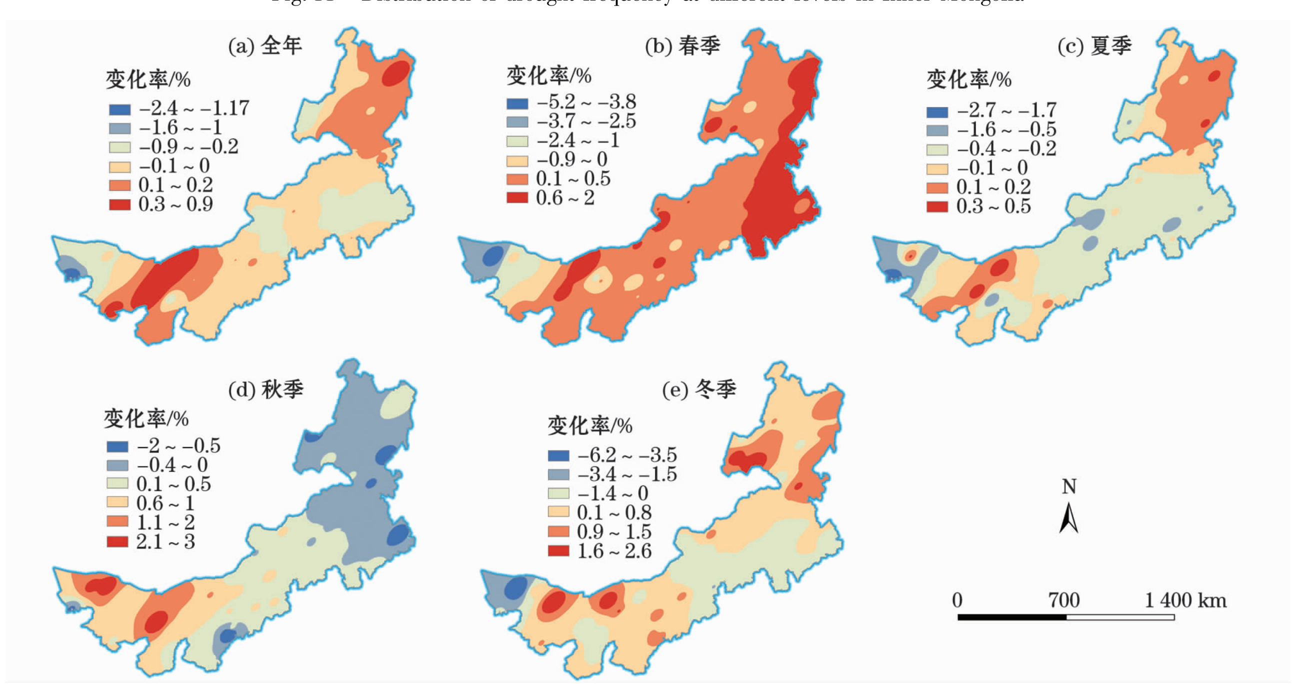


图 12 研究区降水量距平百分率变化趋势率分布

Fig. 12 Spatial distribution of change trend of precipitation anomaly percentage in Inner Mongolia

安岭以东地区、巴彦淖尔市西部和阿拉善盟东北部，而趋势率下降区域主要在巴彦淖尔市临河区和阿拉善盟西部(图12b)。夏、春两季 P_a 变化趋势率范围基本相同,但其趋势率升高区域较春季缩小,至呼伦贝尔市东部和兴安盟北部(图12c)。秋季 P_a 变化趋势率升高区主要集中在巴彦淖尔市以东,阿拉善盟东北部以及西北部地区,而呼伦贝尔市、兴安盟、通辽、赤峰大部、锡林郭勒盟东部和鄂尔多斯市东南部秋季 P_a 变化趋势率下降,说明该区域秋旱逐渐增多(图12d)。冬季 P_a 变化趋势率升高区为呼伦贝尔市东西部、兴安盟大部、锡林郭勒盟中东部、乌兰察布市中部以西至阿拉善盟额济纳旗。该区域范围较大,说明区域内发生冬旱的几率正逐渐降低(图12e)。上述年际和季节 P_a 变化趋势率空间分布与降水量变化趋势率空间分布相吻合。说明研究区气象干旱发生的决定性因素为降水。

3 结论与讨论

本文利用1971—2015年内蒙古地区52个气象站点逐月降水数据,基于降水量距平百分率,分析了该地区降水和干旱的时空分布特征,得出结果如下:

(1)内蒙古地区年际降水量呈微弱的下降趋势,其中,夏季降水量呈减少趋势,其余3季降水量有所增加,此外,研究区降水空间分布不均匀。

(2)年降水量在20世纪70、80年代处于波动期,到90年代呈现出显著的上升趋势,并于1998年和2012年发生突变。季尺度上,春季降水波动较大,从90年代末期开始,降水量呈上升趋势,到了2007年左右,降水上升趋势变得显著,于1982、1988年和1996年发生3次突变;夏季降水波动趋势和年降水波动趋势基本一致,同样于1998年和2012年发生突变;秋季降水只在1976年发生过1次突变,同样,冬季降水量也只在2000年发生过1次突变,其变化趋势从2007年开始呈现出显著的上升趋势。

(3)从年际和季节尺度降水量距平百分率分析,研究区发生轻旱几率较高,中旱次之[9]。各级干旱易发生地区集中在呼伦贝尔市西部、赤峰市中北部、通辽市北部、锡林郭勒盟中西部以及阿拉善盟西部地区,这与韩志慧等[8]应用SPI指数分析内蒙古地区干旱分布的结果大致相同。

(4)降水量变化趋势率和 P_a 变化趋势基本一致,说明研究区气象干旱发生的主要因素为降水。

(5)从整个研究区 P_a 分析,历年干旱次数较少,但是局部干旱情况较多,反映出研究区干旱发生特点为局部、区域性干旱多,全区性干旱少,这一结果与张煦庭等[6]基于SPEI指数分析研究区干旱特征的结论基本相同。

将研究结果与历史资料统计结果对比分析发现,对于干旱典型年份的评测,本文方法较为准确,但对于干旱典型年份的干旱等级计算结果普遍较历史记载偏低,如《中国气象灾害大典》中记载,内蒙古地区1972年和1980年分别遭受了严重的大范围干旱,而文中对该典型年干旱等级识别结果都为轻旱,因此,下一步将针对研究区降水和干旱时空分布特点对 P_a 干旱等级划分标准进行修正,使其更适合于该地区的干旱评价。

参考文献(References):

〔1〕 Rulinda C M, Dilo A, Bijker W, et al. Characterising and quantifying vegetative drought in East Africa using fuzzy modelling and NDVI data〔J〕. Journal of Arid Environments, 2012, 78(3): 169-178.

〔2〕 温克刚,沈建国. 中国气象灾害大典:内蒙古卷〔M〕. 北京:气象出版社,2008.〔Wen Kegang, Shen Jianguo. China Meteorological Disaster Canon: Inner Mongolia Volume〔M〕. Beijing: China Meteorological Press, 2008.〕

〔3〕 刘浏,刘丽丽,索滢. 近53 a黑河流域水文气象要素时空演变特征〔J〕. 干旱区研究,2017,34(3):465-478.〔Liu Liu, Liu Lili, Suo Ying. Spatiotemporal evolution of hydro-meteorological variables in the Heihe River Basin in recent 53 years〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 465-478.〕

〔4〕 韩芳,刘朋涛,牛建明,等. 50 a来内蒙古荒漠草原气候干燥度的空间分布及其演变特征〔J〕. 干旱区研究,2013,30(3): 449-456.〔Han Fang, Liu Pengtao, Niu Jianming, et al. Spatial distribution and evolution of climatic aridity in desert steppe in Inner Mongolia in recent 50 years〔J〕. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 449-456.〕

〔5〕 白美兰,李金田,李喜仓,等. 近50年内蒙古中东部地区春夏季干旱特征分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2013,27(5):131-136.〔Bai Meilan, Li Jintian, Li Xicang, et al. Spring and summer drought characteristics in central and eastern Inner Mongolia nearly 50 years〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(5): 131-136.〕

〔6〕 张煦庭,潘学标,徐琳,等. 基于降水蒸发指数的1960-2015年内蒙古干旱时空特征〔J〕. 农业工程学报,2017,33(15): 190-199.〔Zhang Xuting, Pan Xuebiao, Xu Lin, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia During 1960-2015〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 190-199.〕

〔7〕 王学强,白利云,刘志刚,等. 锡林郭勒盟近 50 a 降水变化及旱涝年分析〔J〕. 内蒙古气象,2012(5):6 - 8.〔Wang Xueqiang, Bai Liyun, Liu Zhigang, et al. Analysis on the precipitation change in recent 50 years and floods and drought years in Xilin Gol League〔J〕. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2012(5):6 - 8.〕

〔8〕 韩志慧,刘小刚,郝琨,等. 基于 SPI 指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测〔J〕. 排灌机械工程学报,2017,35(5):430 - 439.〔Han Zhihui, Liu Xiaogang, Hao Kun, et al. Drought evolution characteristics and trend prediction in Inner Mongolia based on Standardized Precipitation Index〔J〕. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5):430 - 439.〕

〔9〕 周扬,李宁,吉中会,等. 基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征〔J〕. 自然资源学报,2013,28(10):1 694 - 1 706.〔Zhou Yang, Li Ning, Ji Zhonghui, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on standard precipitation index (SPI) in Inner Mongolia during 1981 - 2010〔J〕. Journal of Natural Resource, 2013, 28(10):1 694 - 1 706.〕

〔10〕 Mishra A K, Desai V R. Drought forecasting using stochastic models〔J〕. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2005, 19(5):326 - 339.

〔11〕 GB/T 20481 - 2017,气象干旱等级〔S〕. 北京:中国标准出版社,2017.〔GB/T 20481 - 2017, Grades of Meteorological Drought〔S〕. Beijing: China Standards Press, 2017.〕

〔12〕 Gerstengarbe F W, Werner P C. Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime〔J〕. Climate Research, 1999(11):97 - 107.

〔13〕 牟乐,芦奕晓,杨惠敏,等. 1981—2015 年中国西北牧区植被覆盖的时空变化〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):615 - 623.〔Mou Le, Lu Yixiao, Yang Huimin, et al. Spatiotemporal variation of vegetation cover in the pastoral area in Northwestern China during the period of 1981 - 2015〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(3):615 - 623.〕

Drought Characteristics in Inner Mongolia Based on Precipitation Anomaly Percentage

WU Ying-jie, LI Wei, WANG Wen-jun, QUAN Qiang, CHEN Xiao-jun, YIN Hang, ZHOU Quan-cheng, XU Kai-ran

(*Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot* 010020, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: The monthly precipitation data from 52 meteorological stations in Inner Mongolia from 1971 to 2015 were used. The methods of M-K test and precipitation anomaly percentage (P_a) were used to analyze the change trend and abrupt change of precipitation, and the spatiotemporal variation of drought at different time scales was also analyzed. The results showed that the inter-annual precipitation variation trend was basically maintained, and two abrupt changes took place in 1998 and 2012 in recent 45 years. Precipitation increased in spring, autumn and winter, but it was opposite in summer. Drought events occurred mainly in winter during the period from 1999 to 2011, and their frequency was the lowest in summer. Spatially, the annual precipitation decreased gradually from the east to the west. The change rate of precipitation was high in the area east of the Greater Khingan Mountains and west Bayan Nur, but it was low in Northwest Hulun Buir, central and southern parts of Tongliao, central part of Chifeng, and western Alxa. In addition, the probability of occurring drought at different levels was in an order of slight drought > extreme drought > moderate drought > severe drought. Drought events occurred generally in west Hulun Buir, Central-North Chifeng, North Tongliao, Central-West Xilin Gol League and West Alxa League. The P_a was in an increase trend in Central-East Hulun Buir, West Bayan Nur and East Alxa League, but it was in a decrease trend from South Hinggan League to Erdos and in Central-West Alxa.

Key words: drought level; precipitation anomaly percentage (P_a); Inner Mongolian